

점토굴착 사면의 거동에 관한 원심모형실험 및 수치해석
Centrifuge Model Experiments and Numerical
Analyses on the Behaviour of Excavated Clayey Soil

최 민 수* 정 길 수** 박 병 수*** 유 남 재****
Choi, Min Soo Jeong, Gil-Soo Park, Byung-Soo Yoo, Nam-Jae

Abstract

This paper is the results of experimental and numerical works on analyzing the geotechnical engineering behavior and characteristics of excavated clay slope formed by the method of excavated replacement which is one of treatments in soft soil ground.

For the centrifuge model tests, models of excavated clay slope were prepared by remolding the marine clayey soil sampled from the field. Tests were performed with changing the slope to investigate the behavior of them. On the other hand, numerical analyses were carried out to analyze the change of safety factor against instability of slope with time. Changes of pore water pressure, shear strength and displacement were also investigated.

As results of centrifuge model tests with slopes of 1:1.5 and 1:3 using the confining body of simulating the effect of excavation, for the case of 1:1.5, slope failure occurred right after remove the confining body whereas relatively small displacements within the range of 3.2mm, implying to maintain the stability of slope, were observed for the case of 1:3 slope.

From the results of numerical analyses using the software of PLAXIS to investigate the stability of slope after excavation, the minimum safety factor against slope failure was 1.28 for the case of 1:3 slope.

The further researches in the future are required with considerations of build up of static pore water pressures during acceleration of centrifuge, depth of excavation influencing the behavior of the slope and permeability of the slope since excavation of the slope was not simulated well resulted from the limitations of apparatus at the stage of excavation during the centrifuge tests.

키워드 : 연약지반, 사면안정, 원심모형실험, 굴착치환

Keywords : soft ground, slope stability, centrifugal model test, replacement excavation

1. 서론

연약지반위에 부지를 조성하고 구조물을 축조하는 경우 안정성을 도모하기 위하여 지반개량공법을 적용하는데 국내에서는 타공법에 비하여 공사비용이 상대적으로 절감되는 치환공법을 많이 적용하고 있다. 치환공법의 경우 폭파나 성토하중에 의한 인

* 강원대학교 토목공학과 석사과정
** 강원대학교 토목공학과 박사수료
*** 강원대학교 토목공학과 연구원 공학박사
**** 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

위적인 지반활동에 의해 강제로 양질의 토사로 치환하는 강제치환공법과 지반굴착에 의해 개량대상 지반을 걷어낸 다음 양질토사로 되메우는 굴착치환 방법으로 구분될 수 있다. 과거의 경우 공사비용을 고려하여 주로 강제치환공법을 적용하였으나 치환심도효과에 대한 불확실성을 내포하고 있기 때문에 최근에는 굴착치환공법 적용사례가 꾸준히 증가하는 추세에 있다.

이와 같은 해성점성토지반에 해양구조물 설치를 위한 굴착치환공법 적용시 장기적 사면 안정을 고려하여 1:3~1:5의 사면구배로 굴착하는 경향이 있다. 그러나 낮은 전단강도를 지닌 해성점토의 완만한 구배의 적용은 넓은 면적을 굴착함에 따라 공사기간과 공사비에 많은 부담을 주게 된다. 따라서, 굴착 점성토 사면의 안정성에 관한 경시적 변화에 대한 특성을 연구함으로써 단기간의 사면 안정성을 확보하고 치환제의 투기시기를 결정함으로써 경제 적이며 효율적으로 굴착치환 공법을 수행할 수 있다. 점토지반의 시험조건은 굴착경사면을 변화시키면서 실험을 실시하고 그에 따른 거동특성을 분석하고 수치해석을 실시하여 주어진 경사에 대한 안전율의 경시적 변화를 연구하였다.

2. 굴착 점토사면의 거동

2.1 굴착에 의한 간극수압 및 전단강도의 변화

점토를 굴착시 간극수압이 감소하게 되고 굴착 완료 후 시간이 경과함에 따라 정상침투가 일어나 간극수압이 상승한다. 전단강도는 굴착중에는 급속 시공으로 강도변화가 미약하며 절토 후 시간이 지남에 따라 전단강도가 감소함에 따라 부의 간극수압이 점진적으로 증가하여 사면안정률은 굴착 후 장기시에 최소가 되므로 유효응력 전단강도인 c', ϕ '를 사용하고 간극수압을 고려한 유효응력으로 해석한다.

2.2 안전율의 변화

사면을 절취하는 경우 배수를 병행한다면 시공도중 간극수압은 감소하게 된다. 그러나, 시공완료 후에는 사면내의 지하수에 의하여 정상침투가 일어나게 되어 간극수압은 증가하게 되고 지하수에 의한 정수압이 되어 간극수압은 일정하게 된다. 과압밀 점토에서는 과압밀비가 어느 이상이 되면 굴착중 팽창하려는 성향으로 인하여 부의 간극수압이 발생한다. 시공 중에는 절취로 인하여 절취사면이 불안정하게 되어 높은 부분의 흙이 낮은 부분으로 이동하려는 힘(전단응력)이 증대하므로 안전율은 감소한다. 시공완료 후에는 전단응력은 일정하나 파괴면상에서의 간극수압은 정상침투로 인하여 증대되므로 유효응력의 감소로 전단강도는 감소하며 따라서 안전율도 감소한다. 가장 위험한 상태는 굴착 후 정상침투시때 간극수압이 가장커서 안전율이 최소

가 되므로 안전율계산에 쓰여질 강도정수는 간극수압을 고려한 c', ϕ '를 사용하고 간극수압을 고려한 유효응력으로 해석한다..

3. 모형실험방법

3.1 사용시료

해성점토 지반의 굴착사면에 관한 거동을 분석하기 위하여 원심모형실험을 실시하였다. 원심모형을 실시하기 위하여 사용한 모형지반의 지반공학특성을 구하기 위하여 기본물성시험, 삼축압축시험, 압밀시험을 수행하였다.

3.1.1 기본물성시험

본 연구에 사용된 시료는 부산신항 지역에서 채취한 해성점토시료로 현장에서 교란된 상태로 시료를 채취하여 기본물성시험을 실시한 결과 표와같이 비중 2.71, 액성한계 51.5%, 소성지수 29.1%의 물리적 특성을 보였다.

해성점토의 기본물성

구분	비중	액 소성 한계			입도 분포	
		LL (%)	PL (%)	PI (%)	>0.047 %	USCS
점토	2.71	51.5	22.4	29.1	96.2	CH

3.1.2 압밀시험

압밀시험은 KS F 2316 규정에 의거하여 시료에 점증적으로 하중을 가하여 시료의 압밀을 유도하는 단계별 점증하중 제하 형태의 표준압밀실험을 실시하여 압축지수, 체적압축계수, 압밀계수 등의 압밀정수를 구하였다. 시료 성형은 모형실험시 시료성형방법과 동일하게 실시하였으며 그 결과를 아래표에 나타내었다.

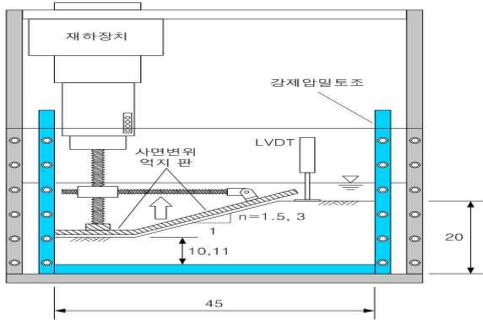
표에서 보는바와 같이 압축지수는 0.54, 투수계수는 $5.02 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 로 나타났다.

압밀시험 결과

구분	c_v (cm^2/sec)	k_v (cm/sec)	C_c	C_s
결과	2.57×10^{-4}	5.02×10^{-8}	0.54	0.1

3.2 실험방법

실험에 사용될 연약지반을 묘사하기 위하여 점토를 함수비 120%로 교반 후 시료의 포화를 유도하기 위하여 24시간 방치한 다음 모형토조에 성형하여 시료의 함수비가 80%가 되도록 공기압을 0.49, 0.98, 1.96MPa 로 4일에 걸쳐 단계적으로 가하여 강제압밀 시켰다. 지반 조성 후 원심 모형기에 장착하여 50G의 중력수준으로 자중압밀을 실시하여 시료 높이를 조절하였다.



굴착사면의 안정성 모형실험 개요

굴착치환시 점토층에서 발생하는 사면의 활동 안정성을 분석하기 위하여 점토지반에 사면을 조성한 다음 사면의 활동변위를 측정하였다. 사면의 경사는 각각 1:1.5, 1:3조건이며, 사면의 높이는 토조의 제원을 고려하여 16cm를 기준으로 하였으며 상사법칙을 적용하는 경우 50G의 중력 현장에서 8m(=16cm×50)에 달하는 실험조건이다.

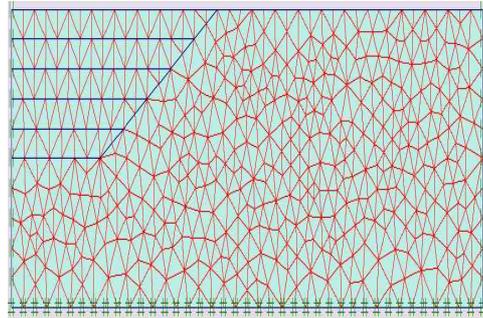
실험은 자중압밀이 완료된 점토지반에 주어진 사면경사와 높이조건에 맞추어 굴착후 사면부에서 굴착이전의 평형상태를 유지하기 위하여 굴착된 지반을 대신하여 변위를 억제하기 위해 구속체를 부착하고 점토층 사면에 완전히 밀착시킨 후 시료를 재성형한 후 원심모형 토조를 원심모형시험기 Swing Basket에 부착하여 중력수준 50G조건으로 가속한다음, 점토층 사면부에서 평형상태를 이룰 수 있도록 현상태를 유지했다. 이후 재하장치를 작동하여 점토층 사면부를 억제하고 있는 구속체를 들어 올려, 사면 하부 설치된 간극수압계와 사면상부에 설치된 LVDT 이용하여 변위를 측정하였고, 실험이 종료된 후 원심모형시험기를 멈추고 토조를 분리하여 사면의 활동형상을 스케치한 다음, 사면 활동구간에서 위치별 함수비를 측정하였다.

4. 수치해석

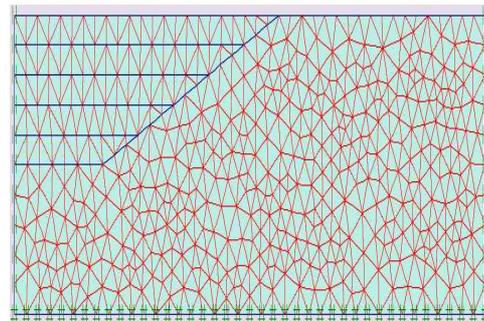
연약지반 굴착시 굴착경사에 따른 사면의 안정성을 검토하기 위하여 범용 유한요소 프로그램인 PLAXIS를 이용하여 수치해석을 실시하였다.

4.1 유한요소 격자망 및 경계조건

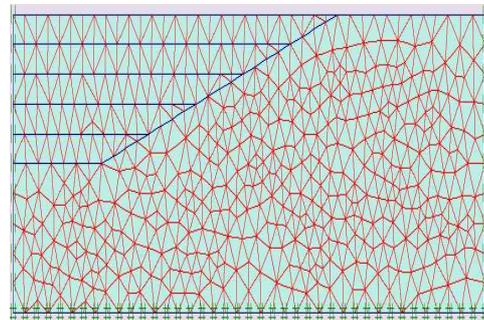
굴착사면에 대한 원심모형 실험결과를 수치해석적으로 검토하기 위하여 아래그림에 나타난 바와같이 유한요소격자망을 구성하였다. 굴착경사는 원심모형실험에서 수행한 1:2, 1:3의 경사조건과 토조폭의 한계로 묘사하지 못한 1:4, 1:5의 굴착경사를 수치해석적으로 검토할 수 있도록 하였다. 한편, 토조 좌·우측은 수평변위를 바닥면은 수직변위를 구속하였으며 초기응력조건은 깊이에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 가정하였고 지하수위는 지표면에 위치하는 것으로 경계조건을 지정하였다.



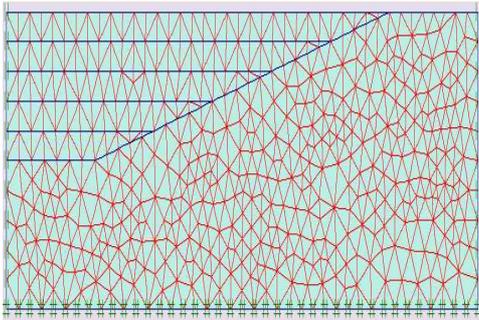
(a) 굴착경사 1:2



(b) 굴착경사 1:3



(c) 굴착경사 1:4



(d) 굴착경사 1:5
굴착사면의 유한요소격자망

4.2 입력변수 및 해석내용

연약점토지반은 CSSM(Critical State Soil Mechanics)의 Cam-clay 모델을 사용하였으며 해석에 사용된 내부마찰각과 점착력은 문헌 값을 참조하여 입력하였고 Cam-clay 모델변수값은 표준 압밀시험결과로부터 구하여 [표 4.1]에 나타내었다.

[표 4.1] Cam-clay 모델 변수값

입력매개변수	변수값
$\lambda^* (= c_c / 2.3(1 + e_o))$	0.085
$\kappa^* (= c_s / 2.3(1 + e_o))$	0.016
$\gamma_{sat} (kN/m^3)$	791.0
$k (m/day)$	0.043
$c (kN/m^2)$	0.981
$\phi (degree)$	15

수치해석은 굴착경사를 1:2, 1:3, 1:4, 1:5로 변화시켜 각 굴착경사에 따라 단계별로 지반을 굴착하였을 때 발생하는 변위와 굴착사면의 안전율을 수치해석적으로 검토하였으며 1일 굴착량을 2m/day로 가정함으로써 각 단계별로 0.02m(0.02m × 50G=1m)를 0.5일에 굴착하는 것으로 하여 5단계에 걸쳐 굴착을 모사하였다.

한편, 단계별 활동안정성 검토는 사면내 지반강도를 감소시켜 파괴를 유발할때의 전단강도비를 안전율로 산정하는 강도 감소법을 이용하여 단계별 사면의 안전율 및 파괴형태와 전단파괴 영역을 확인하였다.

5. 결과분석

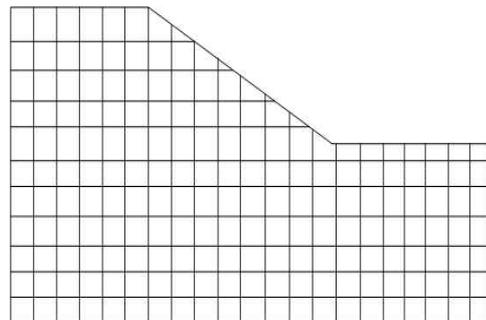
연약지반 굴착시 굴착경사에 따른 사면의 안정성을 검토하기 위하여 굴착경사를 변화시킨 원심모형 실험과 수치해석을 실시하였다.

5.1 원심모형실험

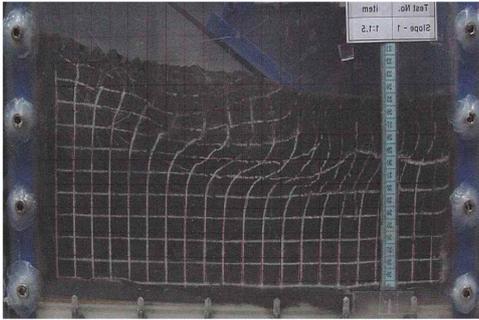
[그림 5.1]은 사면경사 1:2 조건에 대한 사면 안정성관련 모형실험 결과를 나타내는 것으로서 실험 과정을 스케치하여 변위형상을 그렸다. 그림에서 보는 바와 같이 사면경사 1:1.5인 경우 구속체를 드는 순간부터 급격하게 변위가 발생되어 이내 지반파괴가 발생하는 것으로 나타났으며, 활동선이 형성되는 경로를 따라서 함수비를 측정된 결과 평균 63.3%의 함수비 분포를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 결과에 비추어 볼 때 사면경사 1:1.5의 경우 굴착직후 지반파괴가 발생되기 때문에 사면경사 적용이 불가할 것으로 판단된다.



(a) 굴착초기 사진



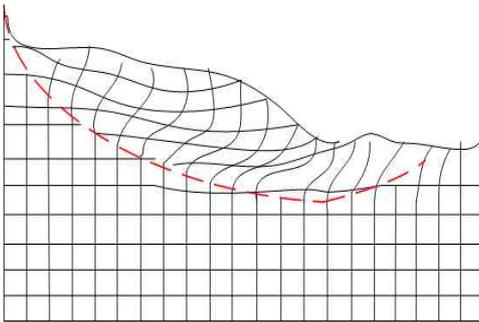
(b) 굴착초기 지반변위



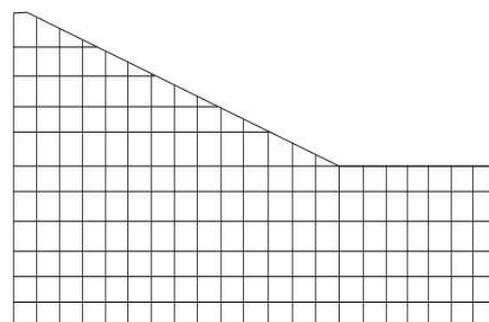
(c) 실험종료 후 사진



(a) 굴착초기 사진



(d) 실험종료 후 지반변위



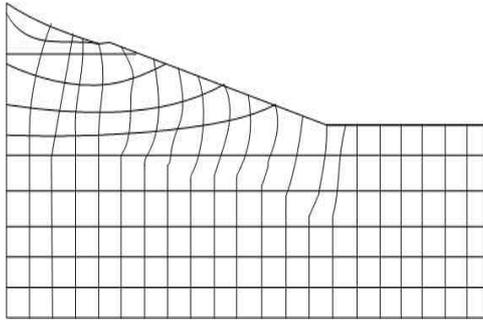
(b) 굴착초기 지반변위

[그림 5.1] 굴착사면의 안정성 모형실험결과
(사면경사 1:1.5)

[그림 5.2]는 사면경사 1:3 조건에 대한 모형실험 결과를 나타낸다. 그림에서 실험 종료 후 촬영한 사진과 변위 스케치 자료를 볼때 일부 변위가 발생하는 것으로 나타났으나, 이는 일부 구간에서 굴착 후 변위 억지용 판을 사면에 밀착하는 과정에서 완전하게 밀착되지 않아 중력수준 50G로 가속하는 과정과 굴착직후 교란된 지반에 대하여 평형을 이루기 위해 압밀을 실시하는 과정에서 발생된 변위이며, 이후 구속체를 제거한 후에 발생되는 변위는 3.2 mm 이내로 나타나 비교적 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

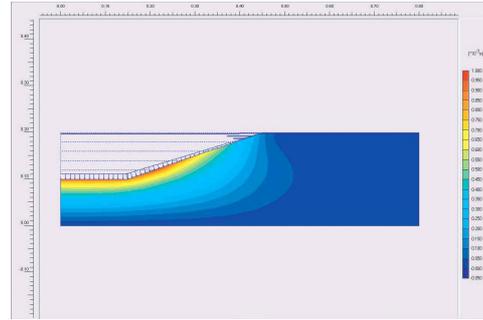


(c) 실험종료 후 사진



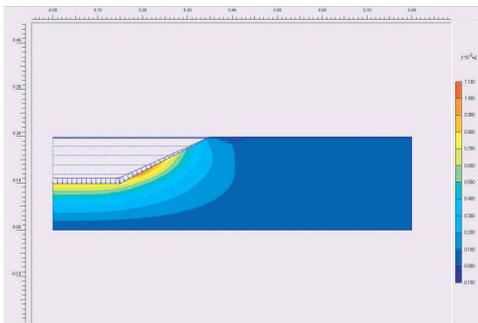
(d) 실험종료 후 지반변위

[그림 5.2] 굴착사면의 안정성 모형실험 결과
 (사면경사 1:3)

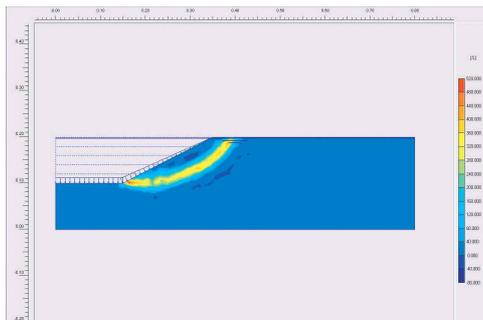


(a) 굴착사면 변위

5.2 수치해석 결과

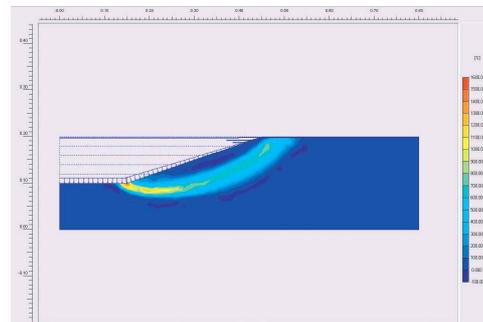


(a) 굴착사면 변위



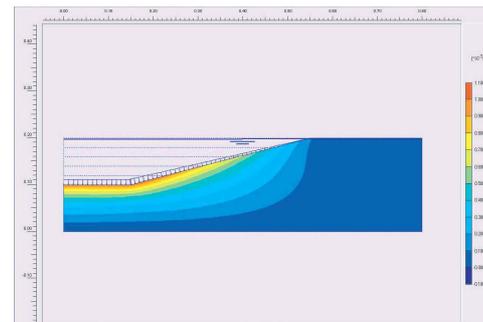
(b) 전단응력 분포도

[그림 5.3] 굴착사면의 안정성해석 결과
 (굴착경사 1:2)

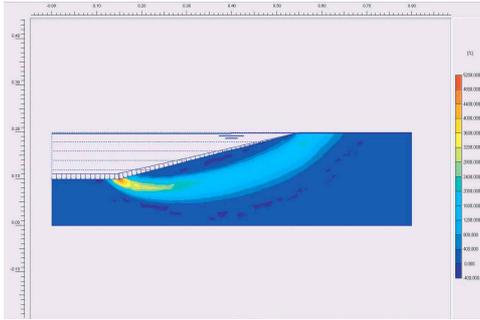


(b) 전단응력 분포도

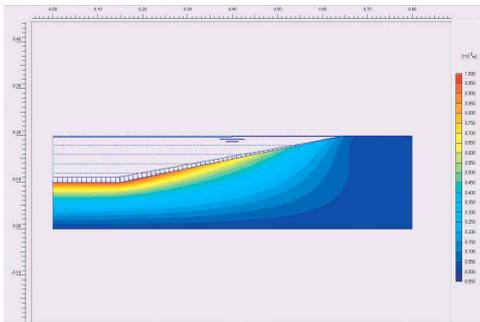
[그림 5.4] 굴착사면의 안정성해석 결과
 (굴착경사 1:3)



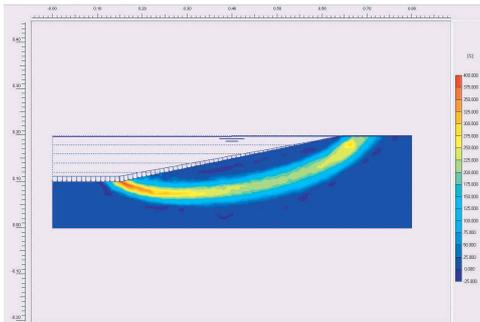
(a) 굴착사면 변위



(b) 전단응력 분포도
 [그림 5.5] 굴착사면의 안정성해석 결과
 (굴착경사 1:4)



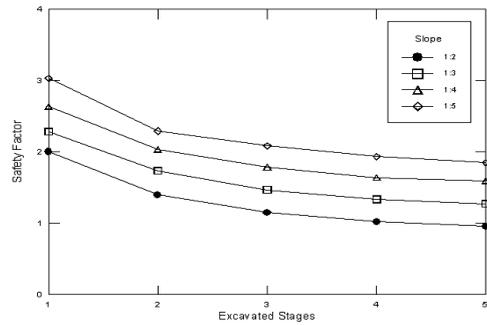
(a) 굴착사면 변위



(b) 전단응력 분포도
 [그림 5.6] 굴착사면의 안정성해석 결과
 (굴착경사 1:5)

굴착경사에 대한 각 단계별로 지반을 굴착하였을 때 발생하는 전단응력분포와 단계별 안전율을 [그림 5.3]~[그림 5.7]에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 굴착경사가 1:2일 때는 5단계 굴착 시 활동이 발생하여 사면안정성을 확보하지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 굴착경사가 1:3에서 1:4, 1:5로 증가

함에 따라 단계별 안전율을 증가하는 것으로 나타났으며 이에 따른 지반변위도 감소함을 나타내었다. 그러나 이러한 결과는 강도 정수값과 일일굴착량을 가정하고, 굴착방법과 조건등을 고려하지 않고 단순화시켜 나타낸 결과로서, 강도 정수값이 굴착사면의 안정성에 결정적인 영향을 미치는 것을 고려할 때 정확한 강도정수의 산정과 굴착조건이나 방법에 따라 굴착단계별 사면의 안전율은 변화할 것으로 판단된다.



[그림 5.7] 굴착경사에 따른 안전율 산정결과

6. 결론

연약지반 굴착시 굴착경사에 따른 사면의 안정성을 검토하기 위하여 굴착경사를 변화시킨 원심모형 실험과 수치해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 점토지반 굴착에 의해 발생하는 사면의 안정성을 검토하기 위하여 사면경사 1:2, 1:3의 조건에 대하여 구속체를 이용한 모형시험결과 1:2 경사조건의 경우 구속체 제거 직후 지반파괴가 발생되며, 1:3 경사조건의 경우 구속체 제거 후 3.2mm이내의 변위가 발생되며 비교적 안정성을 유지하는 것으로 나타났다.
- 2) PLAXIS 프로그램을 이용하여 점토지반 굴착시 사면경사에 따른 안전율을 분석한 결과 해석조건 범위에 대하여 굴착경사가 1:2인 경우 0.96의 안전율까지 떨어지지만 1:3이상을 유지하는 경우 굴착시 최소 1.28이상의 안전율을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.
- 3) 점토지반 굴착시 굴착사면을 묘사할 때 사면을 제대로 묘사하지 못하고 장비의 제한적인 조건으로 중력수준 가속시 정수압의 영향, 지반의 거동에 영향을 주는 굴착지점, 투수계수 등 변수들의 고려와 실제시공사례의 정밀분석을 통하여 향후 추가적인 연구가 요구된다.

참고문헌

- [1] Hiroyuki Tanaka, Behavior of a Braced Excavation in Soft Clay and the Undrained Shear Strength for Passive Earth Pressure," *Soil and Foundations*, Vol. 34, No.1, pp.53-64, 1994.
- [2] 김찬기, "준설사면의 안정성에 관한 연구, 연세대학교, 1999.
- [3] Bjerrum, L. and Eide, O., "Stability of Struttred Excavations in Clay," *Geotechnique*, Vol.6, No.1, pp.32 - 47, 1992.
- [4] Tanaka,H., "Base Failure of Braced Excavations Stabilized by DM Method ," *Proc. of 13th ICSMFE*, pp, 1745 - 1748. 1994.